

Analyse et gestion des agroécosystèmes: Utilisation d'une approche démographique

J. Baumgärtner

Institut des Sciences des Plantes, EPF, CH-8092 Zürich Suisse

O. Bonato

Laboratoire d'Entomologie Agricole, ORSTOM, B.P. 181, Brazzaville Congo

RESUME

L'approche démographique utilisée dans l'analyse et la gestion des agroécosystèmes est discutée avec l'aide de quelques exemples. Les populations animales (phytophages, prédateurs) et végétales (plantes et leurs organes végétatifs et reproductifs), ayant des structures d'âge variant dans le temps, constituent les éléments de ces systèmes. Le modèle à retard distribué variant dans le temps est identifié comme étant une méthode adéquate pour représenter les événements phénologiques dans le développement d'une population. L'addition au modèle de la mortalité et de la migration permet une bonne simulation de la dynamique d'une population. Les interactions entre les populations, telles que la compétition, la phytophagie et la prédation, peuvent être étudiées à l'aide d'un modèle de flux énergétique ou «pool métabolique». Avec l'association de ces deux type de modèles on peut à la fois étudier les interactions entre plusieurs niveaux trophiques et procéder à une évaluation des facteurs qualitatifs tels que l'eau et l'azote. L'application de cette approche a été testée successivement dans le cadre de la lutte dirigée, de la protection intégrée, et enfin dans la gestion des agroécosystèmes. D'un point de vue théorique, son utilisation permet l'étude et l'analyse de ces systèmes, et d'un point de vue pratique elle apporte les éléments nécessaires à une bonne gestion de tels systèmes.

Introduction

Dans la nature, les individus et les groupes d'individus ne vivent généralement pas de manière isolée, mais ont développé au contraire des inter-relations complexes. Bien que l'importance de ces relations pour l'existence des individus, des populations ainsi que des espèces elles-mêmes soit connue depuis longtemps, l'utilisation de méthodes adéquates pour leur étude est assez récente. En effet, ce n'est qu'au début des années 70 que les principes de l'analyse des systèmes ont été introduits dans la recherche des agroécosystèmes, afin de développer des programmes de protection intégrée (HUFFAKER et CROFT, 1976). Par conséquent, on ne dispose actuellement que d'une expérience limitée sur l'application de ces principes. Ceci explique donc d'une part l'absence d'une théorie consolidée, et d'autre part d'une méthodologie généralement acceptée pour leur étude (BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990b). Récemment, les différentes approches choisies pour l'analyse des agroécosystèmes ont été brièvement discutées sur le plan pratique par GETZ et GUTIERREZ (1982), BAUMGÄRTNER et GUTIERREZ (1989) et sur le plan théorique par ÅGREN et BOSATTA (1990).

Il ne s'agit pas ici de discuter ces différentes approches et encore moins de les comparer entre elles, mais simplement d'effectuer une brève présentation de l'approche démographique qui s'est avérée très utile dans nos recherches sur l'analyse des agroécosystèmes comme par exemple ceux du coton, du pommier, du niébé et de la vigne (GUTIERREZ *et al.*, 1987; BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990c; TAMO et BAUMGÄRTNER, 1991; WERMELINGER *et al.* 1991). Ces résultats sont le produit d'une fructueuse collabo-

ORSTOM Fonds Documentaire¹⁷⁷

N° 38.642 ex 1

Cote B

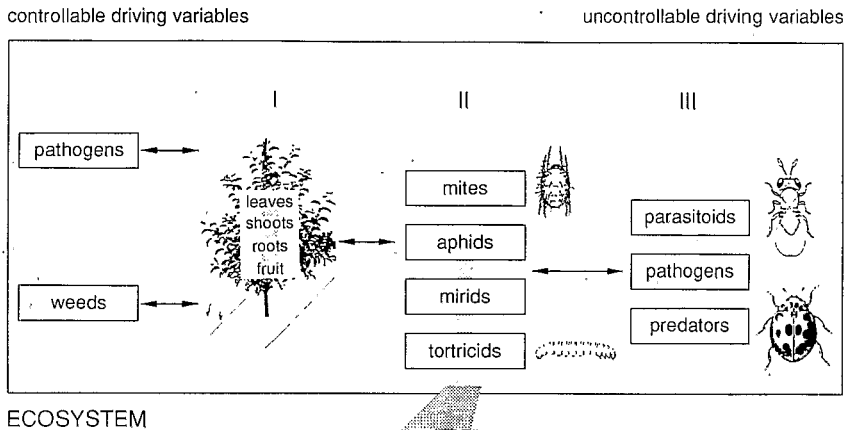
29 OCT. 1993

ration avec le Prof. A.P. GUTIERREZ de l'Université de Californie à Berkeley (voir GUTIERREZ *et al.*, 1987; BAUMGÄRTNER et GUTIERREZ, 1989) et le Dr. M. SEVERINI de l'Instituto di Fisica dell'Atmosfera à Rome (voir BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990b; SEVERINI *et al.*, 1990a, b). Cette approche devrait nous fournir essentiellement une base théorique sur laquelle la méthodologie la plus adéquate pourrait être développée.

L'approche démographique et les agroécosystèmes

Composantes de l'agroécosystème

Un agroécosystème est, selon notre approche démographique, composé de différentes populations qui sont en interactions et qui se développent sous l'influence de variables directrices (Fig. 1). Ces populations, qui sont la plupart du temps constituées par des-



individus poikilothermiques, peuvent être soit sous l'influence de l'action humaine (par exemple, l'eau apportée par irrigation), soit sous l'influence d'autres facteurs (radiation solaire, température de l'air...), rarement et difficilement manipulables. Les plantes ainsi que leurs organes (organes reproductifs ou tout simplement «les fruits», les tiges, les feuilles et les racines) sont aussi considérés comme des populations qui peuvent être soumises à des analyses démographiques. Du point de vue pratique ce concept facilite l'analyse des agroécosystèmes, tandis que du point de vue théorique, il crée un lien entre la démographie classique et la physiologie des plantes et de leurs peuplements (GUTIERREZ *et al.*, 1987, BAUMGÄRTNER et GUTIERREZ, 1989). De la même façon, les pathogènes et les adventices peuvent être traités comme des populations.

La figure 1 montre les caractéristiques des différentes relations existant au sein d'un agroécosystème. Pour un même niveau trophique les populations sont en compétition vis-à-vis des ressources disponibles au niveau trophique inférieur. Entre les différents niveaux trophiques il existe des relations de type phytophagie et prédation (qui dans ce travail comprend aussi le parasitisme).

Développement des populations

Pour le choix de la méthode, il est tout d'abord important de retenir que d'une manière générale sur le terrain, les populations ont une structure d'âge qui varie dans le temps.

On peut représenter l'âge par une variable continue, et arriver de cette manière au développement de modèles de simulation. D'après GUTIERREZ et WANG (1976), WANG *et al.* (1977) et CURRY et FELDMAN (1987) le nombre d'individus (N), qui varie avec le temps (t) et l'âge (a) peut être exprimé de façon convenable et concise avec les équations de VON FOERSTER (1959)

$$\frac{dN}{dt} + \frac{dN}{da} = -\mu(a) \cdot N(t, a) \quad \text{pour } t, a > 0$$

et [1]

$$N(t, 0) = \int_0^{\infty} \Omega(a) \cdot N(t, a) da \quad \text{pour } t > 0$$

dans lesquelles $\mu(a)$ représente la mortalité et $\Omega(a)$ le taux de natalité dépendant uniquement de l'âge. Généralement au champ, μ et Ω ne dépendent pas seulement de l'âge mais aussi des variables directrices dont l'impact change avec le temps. Dans ce cas, une solution analytique de l'équation n'est plus possible, l'équation de VON FOERSTER (1959) doit être transformée en une forme discrète dont le traitement requiert l'utilisation de modèles de simulation (WANG *et al.*, 1977).

Il est aussi important de retenir que, dans une population donnée, chaque individu passe durant sa vie par une succession de stades différents: par exemple les stades œuf, larve, chrysalide et adulte pour les lépidoptères. De même les organes des végétaux passent aussi par différentes phases phénologiques. On peut donc représenter d'après des observations de terrain la structure d'âge d'une population (stades chez les arthropodes ou phases pour les plantes) par des matrices de stade-fréquence (SEVERINI *et al.*, 1990b). Des méthodes relatives aux matrices de stade-fréquence permettent d'estimer les éléments des tables de survie spécifiques à l'âge (MANLY, 1989). FOUQUE *et al.*, (1990) ont utilisé le modèle de MANLY (1987) pour calculer, chez le moustique *Aedes vexans* (MEIGEN), le nombre de cohortes et leur durée de développement ainsi que leur mortalité en conditions naturelles. On a utilisé alternativement des matrices de stade-

fréquence pour en dériver un modèle qui représente au mieux les mécanismes conduisant à la matrice étudiée. C'est l'utilisation de cette méthode qui a permis à SEVERINI *et al.* (1990a) de choisir le modèle à retard ou délai réparti (on parle communément de délai) variant dans le temps de MANETSCH (1976) et VANSICKLE (1977) comme modèle adéquat pour l'étude des processus démographiques:

$$\frac{dr_h(t)}{dt} = \frac{1}{DEL(t)} [r_{h-1}(t) - (1 + \frac{1}{H} \cdot \frac{dDEL(t)}{dt} + B(t) \cdot \frac{DEL(t)}{H}) \cdot r_h(t)] \quad [2]$$

h=1,2,...H

- h = index de sous-stade
- r₀ = flux d'individus entrant dans le premier sous-stade
- r_h(t) = 'flux intermédiaire, i.e. le flux d'individus sortant du sous-stade h
- H = nombre des sous-stades ou paramètre de stochasticité
- B(t) = taux instantané de perte (attrition)
- DEL(t) = durée instantané de développement

En général les composantes des systèmes sont des organismes poïkilothermiques dont la durée de développement dépend de la température T. Cette caractéristique peut être représentée par deux méthodes différentes (MANETSCH, 1976; VANSICKLE, 1977; SEVERINI *et al.*, 1990a): on peut substituer la durée exprimée en temps chronologique t par une durée en temps physiologique t' qui est exprimée le plus souvent en degré-jours (GILBERT *et al.*, 1976; GUTIERREZ *et al.*, 1984). Alternativement, les fonctions de B(T) et DEL(t) de l'éqn. [2] sont modifiées directement en B(T[t]) et DEL(T[t]), afin d'y ajouter l'influence de la température (BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990a, CERUTTI *et al.*, 1991).

Interactions entre les populations

Il est important de tenir compte des interactions qui généralement sont décrites et analysées avec des fonctions spécifiques pour la compétition, la réponse fonctionnelle g(N,P) et la réponse numérique v · g(N,P) (BEDDINGTON *et al.*, 1976; HASSELL *et al.*, 1976; HASSELL, 1978). Sans respecter la structure d'âge les deux dernières peuvent être exprimées par

$$\begin{aligned} dN/dt &= F(N) - g(N,P) \cdot P \\ dP/dt &= v \cdot g(N,P) - \mu \cdot P \end{aligned} \quad [3]$$

où N et P représentent la densité de la proie et des prédateurs (ou parasitoïdes), t le temps, F(N) la multiplication de la proie en absence des prédateurs, v l'efficacité de conversion, μ le taux de mortalité par prédateur (voir par exemple TOFT, 1986). En général ces fonctions traitent les interactions entre des nombre de phytophages et de leurs ennemis naturels.

L'approche démographique demande un modèle plus général qui est valable pour toutes les relations définies ci-dessus. De plus, le modèle recherché ne doit pas se limiter au nombre des individus qui interagissent, mais aussi aux ressources qu'ils échangent comme l'eau et l'azote. Le modèle de pool métabolique (Fig. 2), incorporé dans le cadre des processus démographiques, s'est avéré particulièrement adéquat pour cette approche (GUTIERREZ *et al.*, 1981; GUTIERREZ *et al.*, 1987; BAUMGÄRTNER et GUTIERREZ, 1989; GRAF *et al.*, 1990). Les avantages d'un tel modèle ne sont pas limités au traitement

Acquisition

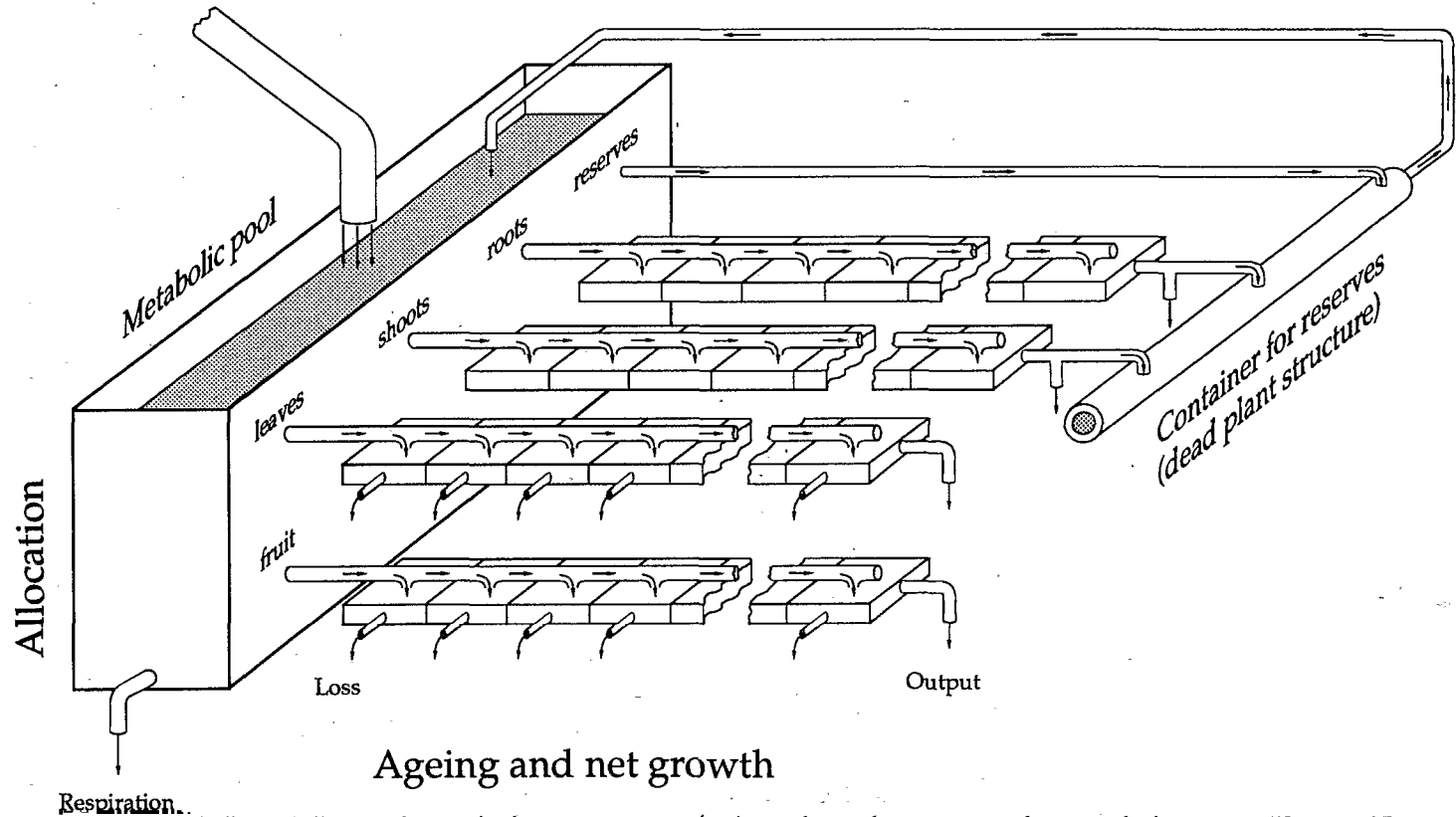


Fig. 2 The metabolic pool allocates the acquired resources to respiration and growth processes, as for example, in cowpeas (TAMO and BAUM-

des différents types de relation mais s'étendent aussi à la représentation des flux de matériel lors des interactions. Alors que les modèles traditionnels ne traitent les interactions que sur la base du nombre et de la masse, le modèle de pool métabolique permet en plus de représenter les flux de matériel tel que l'eau et l'azote (GUTIERREZ *et al.*, 1987; WERMELINGER *et al.*, 1991).

La phénologie et la dynamique d'une population

Il y a des populations qui n'ont que des inter-relations négligeables avec les autres populations. Dans ce cas, chaque population peut être traitée isolément hors de l'écosystème comme un système démographique à part entière (Fig. 1). Par définition, un tel système se compose de la population avec ses caractéristiques intrinsèques, ainsi que de variables directrices ayant une influence significative (CLARK *et al.*, 1967).

Dans certains cas, on ne s'intéresse qu'à des événements phénologiques dans la dynamique de la population étudiée: par exemple, le moment du passage des individus du stade de chrysalide au stade adulte est un événement que l'on peut facilement simuler avec le modèle de délai de MANETSCH (1976) (Fig. 3, BAUMGÄRTNER et BARONIO, 1988). Ce modèle ne considère que la variabilité dans la durée de développement des individus et les variables directrices sont limitées à la température et à la photopériode. Le modèle de délai est utilisé depuis longtemps dans des systèmes de prévision en lutte dirigée (WELCH *et al.*, 1978; WELCH 1984). Il peut être amélioré en ajoutant (à l'aide de modèles de même nature) la répartition spatiale des individus ainsi que leur température moyenne propre (BAUMGÄRTNER et SEVERINI 1987):

En général, pour la prise de décisions concernant la gestion d'un agroécosystème, on ne se contente pas de connaître le moment d'intervention d'un événement phénologique. Dans la plupart des cas, c'est le nombre d'individus qui est important pour la dynamique de l'écosystème, voir pour le rendement de la culture considérée. A titre d'exemple, on peut, avec l'aide du modèle de délai variant dans le temps, qui, à travers l'attrition, respecte la mortalité ainsi que la migration (VANSICKLE, 1977; BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990a), simuler la dynamique des populations de la cicadelle *Empoasca vitis* Goethe en vignoble tessinois, en Suisse (CERUTTI *et al.*, 1991). Cette cicadelle hiverne à l'état adulte sur les conifères proches des cultures. Ainsi, la présence d'une flore (rosiers par exemple) qui permet le développement d'autres espèces de cicadelles assure la présence permanente du parasitoïde oophage *Anagrus atomus* Haliday qui contrôle *E. vitis* d'une manière satisfaisante (Fig. 4). Dans ce cas, le modèle s'est montré utile pour la recherche d'une stratégie de contrôle basée, par exemple sur la modification du milieu écologique du ravageur et de ces ennemis naturels.

Par exemple pour les plantes, les différentes populations d'organes (feuille, tige, racine, fruit) sont en compétition pour la répartition des carbohydrates qui sont les produits de la photosynthèse et dont ils ont besoin pour leur croissance. Le modèle de pool métabolique (GUTIERREZ et WANG, 1976) s'est avéré très utile pour l'étude des phénomènes de compétition pour les ressources: par exemple pour le coton (GUTIERREZ *et al.*, 1975, 1987), le pommier (BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990c), le manioc (GUTIERREZ 1987, 1988a), la vigne (WERMELINGER *et al.*, 1991) et le niébé (TAMO et BAUMGÄRTNER, 1991). Une connaissance approfondie de la croissance des plantes est une condition préalable dans le cadre d'étude d'interactions intratrophiques.

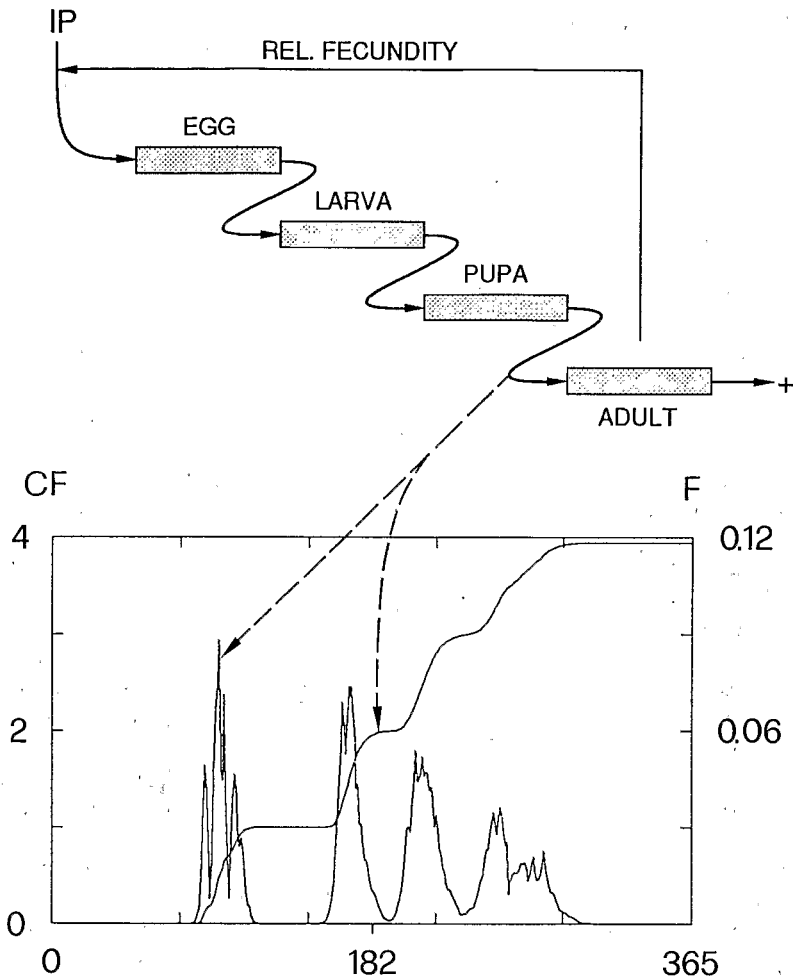


Fig. 3 The simulated flight phenology of *Lobesia botrana* (IP = standardized initial density (1.0), CF = cumulative flight intensity, F = daily flight intensity, after BAUMGÄRTNER and BARONIO, 1988). La phénologie de vol simulée pour *Lobesia botrana* (IP = densité initiale standard (1.0), CF = L'intensité cumulative du vol, F = Taux journalier de vol). (d'après BAUMGÄRTNER et BARONIO, 1988).

Les interactions a deux niveaux trophiques

L'étude d'un système démographique d'une espèce ne constitue qu'un cas particulier dans l'analyse et la gestion des agroécosystèmes. En général, une analyse approfondie demande l'étude des relations entre les populations, telles que la compétition, la phytophagie et la prédation. On trouve dans la bibliographie des méthodes spécifiques à l'étude de chaque type de relation, c'est pourquoi, il faut renoncer au concept de système d'une seule population et revenir vers l'agroécosystème présenté auparavant (Fig. 1).

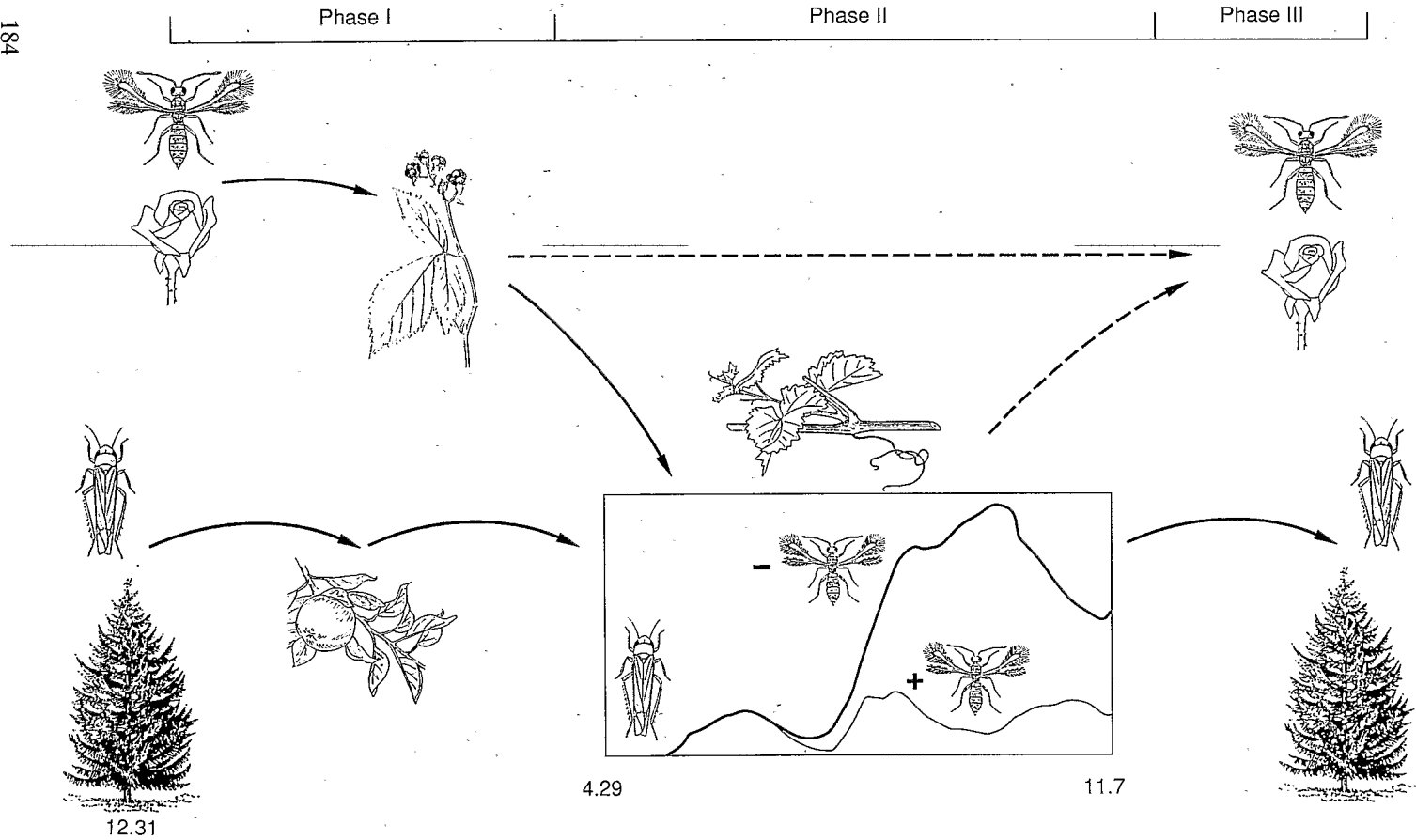


Fig. 4 The simulated population density of the leafhopper *Empoasca vitis* in presence and absence of the egg parasitoid *Anagrus atomus* after CERUTTI *et al.*, 1991). La densité de population simulée de la cicadelle *Empoasca vitis* en présence et en absence de son parasitoïde cophage *Anagrus atomus* (d'après CERUTTI *et al.*, 1991).

Le modèle permet simultanément l'étude de la compétition entre les organes de la plante et la phytophagie, il possède des propriétés qui le rendent utile dans l'évaluation de l'importance des ravageurs, c'est à dire qu'il permet dans la protection intégrée, la recherche d'un seuil en dessous duquel les dégâts causés par les ravageurs ont une incidence économique négligeable. Récemment, ces aspects ont été considérés pour étudier la nuisibilité de *Megalurothrips sjostedti* (TRYBOM) dans la culture du niébé en Afrique de l'ouest (TAMO *et al.*, 1991). De la même manière, l'étude du rôle des ennemis naturels des phytophages permet d'ajouter des informations supplémentaires requises pour la protection intégrée.

Les interactions multitrophiques

L'association du modèle de délai variant dans le temps (qui tient compte de la mortalité et de la migration) au modèle de pool métabolique, nous permet de traiter des relations très complexes à l'intérieur d'un agroécosystème.

On a pu étudier, par exemple, la dynamique du nombre et de la masse des organes du pommier, afin de mieux comprendre la dynamique des acariens phytophages (ZAHNER et BAUMGÄRTNER, 1988) et de leur contrôle par l'acarien prédateur *Typhlodromus pyri* Scheuten (BAUMGÄRTNER *et al.*, 1989). La figure 5 montre les résultats d'une simulation entreprise pour représenter la dynamique des populations à la suite de l'introduction du prédateur dans un verger en Suisse romande. Cependant, le contrôle de la proie (qui est aussi le ravageur) n'est pas toujours aussi satisfaisant que dans ce cas.

A l'aide de modèles de simulation CROFT et WELCH (1983) ont pu démontrer pour le ravageur *Panonychus ulmi* (KOCH) et son prédateur *Amblyseius fallacis* Garman, que le degré de contrôle dépendait de la densité initiale de la proie. S'il y a peu de prédateurs par rapport au nombre de proies, on recommande à l'agriculteur d'intervenir.

La figure 6 montre un autre cas de contrôlé, insatisfaisant celui-là: si les organes reproductifs sont éliminés, le modèle prévoit une croissance excessive des organes végétatifs qui 'diluent' les proies. En conséquence, les prédateurs sont moins efficaces et les proies échappent à leur contrôle (BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990c, Fig. 6).

Le modèle du système «manioc-*Phenacoccus mailhoti* Mat.-Fer. - *Epidinocarsis lopezi* De Santis - *Mononychellus tanajoa* Bondar» est une extension du modèle précédent dans deux directions. Tout d'abord, il traite un nombre plus élevé de populations et, par conséquent, plus d'interactions. En plus, le modèle n'est pas limité au nombre et à la masse des populations mais traite également l'eau et l'azote incorporés dans ces popu-

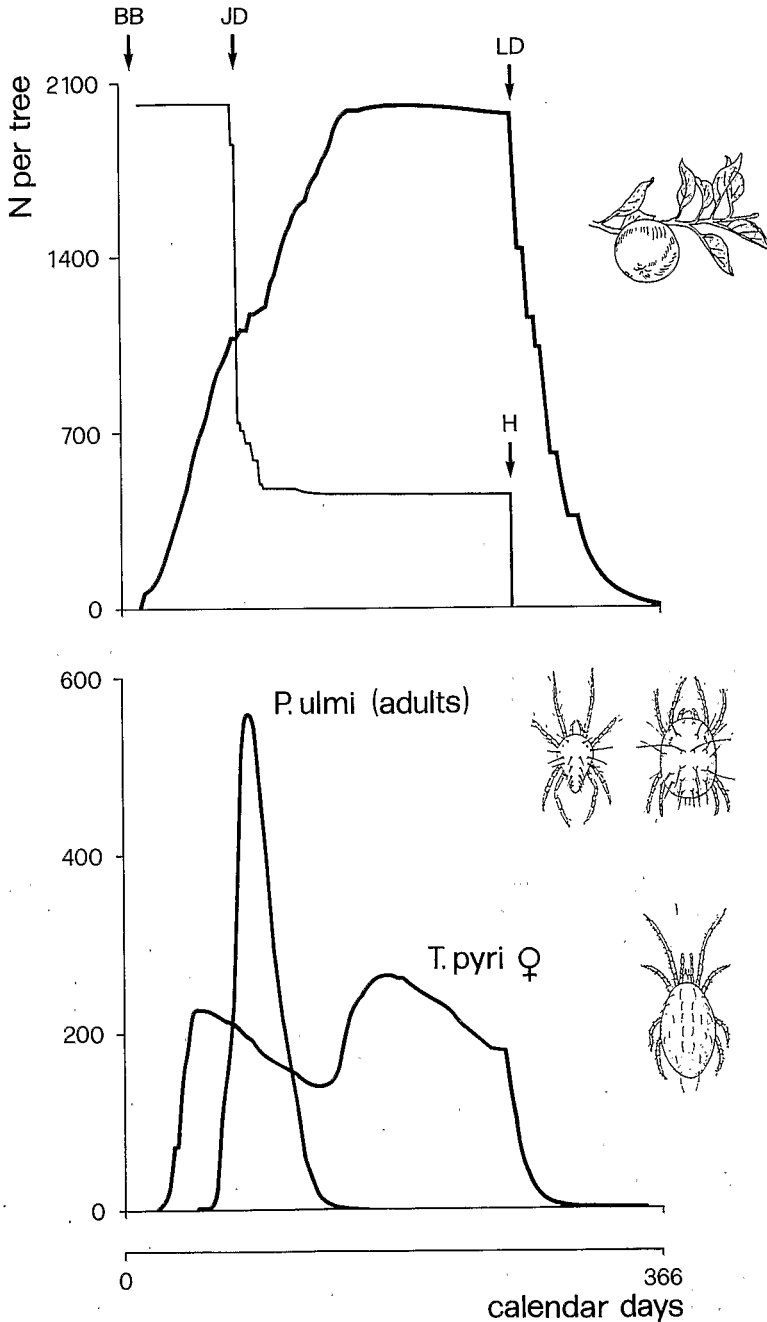


Fig. 5 The simulated dynamics of the apple tree-*Panonychus ulmi*-*Typhlodromus pyri* system (BAUMGÄRTNER *et al.*, 1989) (N = number of fruit, leaves and mites, BB = bud break, JD = June drop, H = harvest, LD = leaf drop). La dynamique simulée du système 'pommier-*Panonychus ulmi*-*Typhlodromus pyri* (BAUMGÄRTNER *et al.*, 1989) N = nombre de fruits feuilles et d'acariens, BB = débourrement, JD = chute de juin, H = récolte, LD = chute des feuilles).

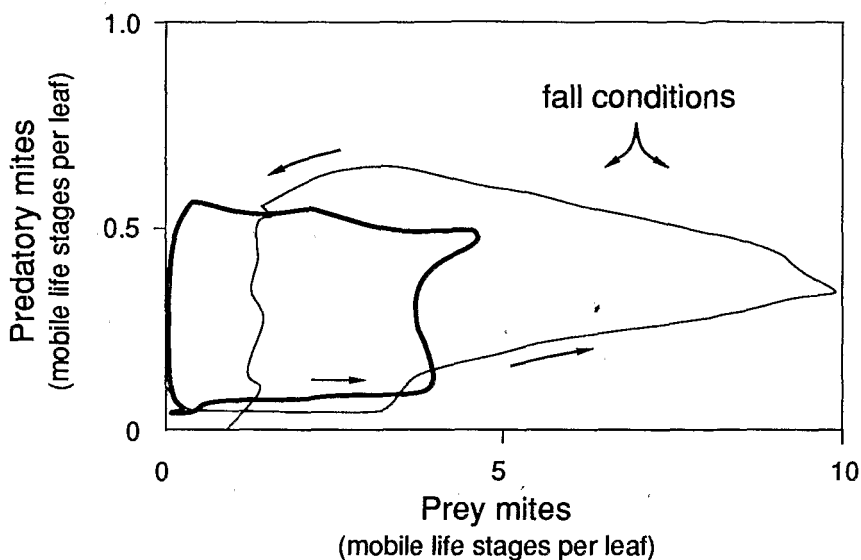


Fig. 6 The simulated densities of the prey *Panonychus ulmi* and the predator *Typhlodromus pyri*. The prey escapes if it is 'diluted' by excessive vegetative growth due to simulated fruit removal (BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990c). La densité, simulée de la proie *Panonychus ulmi* et de son prédateur *Typhlodromus pyri*. La proie échappe au contrôle si elle est dispersée à cause d'une croissance végétative excessive après élimination simulée des fruits (BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990c).

Conclusions

Le concept de base de cette approche démographique est l'utilisation en parallèle du modèle de délai de MANETSCH (1976) et VANSICKLE (1977), qui représente le développement des populations (animales et végétales), et du modèle de pool métabolique (GUTIERREZ et WANG, 1976), qui sert pour l'étude des interactions à l'intérieur d'un même niveau trophique et entre plusieurs niveaux trophiques. Les applications de ce type d'approche dans différentes situations agroécologiques nous permettent de penser que, pour appréhender l'étude des systèmes, l'association des deux modèles s'avère d'une grande utilité, et de confirmer que ces deux éléments sont nécessaires à l'analyse des agroécosystèmes. Dans des cas plus appliqués (Fig. 7), le développement de cette approche a apporté des éléments indispensables pour améliorer la lutte dirigée, la protection intégrée ainsi que la gestion des agroécosystèmes.

L'utilisation de la méthode sur des systèmes comprenant plusieurs niveaux trophiques c'est-à-dire des systèmes intégrant de plus en plus d'interactions, nous a conduit à un traitement d'une complexité croissante. Plus le système se complique plus les résultats obtenus à chaque étape sont difficilement utilisables directement dans la pratique: par exemple, si l'on s'intéresse à un événement phénologique (qui est un système très simple), la prévision de cet événement est un outil facilement réalisable et utilisable. Par contre, si l'on s'intéresse à des systèmes globaux et à leurs évaluations, l'application pratique des résultats ne peut se faire directement et simplement mais suivant certaines règles et conditions définies (BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990c).

LIFE SYSTEM

PHENOLOGY

TWO-TROPHIC POPULATION
SYSTEMS

DYNAMICS

ARTHROPODS X PLANTS

HERBIVORY
COMPETITION

ARTHROPODS X ARTHROPODS

PREDATION
PARASITISM
COMPETITION

ECOSYSTEM

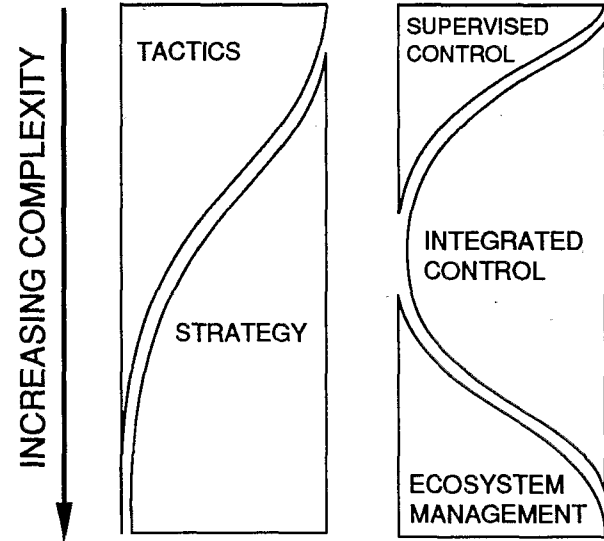
STRUCTURE AND
DYNAMICS

Fig. 7 The different steps in the development of an agroecosystem model and the way they are applied in plant protection and crop management. Les différentes étapes du développement d'un modèle d'agroécosystème et la manière de les appliquer en phytiairie et dans la gestion des cultures.

Cette approche démographique s'avère être un outil très intéressant par la dualité de son utilisation. Son application, d'une grande utilité, permet lors de l'étude et de l'analyse des agroécosystèmes, de beaucoup aider à la compréhension des interrelations entre les différentes populations. De plus, sur le plan pratique, elle peut apporter les éléments souvent nécessaires à une bonne gestion de tels systèmes.

REMERCIEMENTS

Au Dr. J. GUTIERREZ du Laboratoire D'Acarologie Appliquée de Montpellier (France), au Dr. V. DELUCCHI et à Mlle F. FOUQUE de l'Institut des Sciences des Plantes, EPF Zürich, pour la lecture critique du manuscrit. Au Dr. P. RUBLI du même institut pour la réalisation des illustrations.

ZUSAMMENFASSUNG

Das demographische Vorgehen bei der Analyse und der Bewirtschaftung von Agroökosystemen wird anhand von einigen Beispielen diskutiert. Populationen mit zeitvariablen Altersstrukturen sind die Elemente der Systeme. Das zeitvariable Delay-Modell wird als eine geeignete Methode für die Darstellung von phänologischen Ereignissen in der Entwicklung einer Population identifiziert. Die Berücksichtigung von Mortalität und Migration führt zu einem Modell für die Simulation der Populationsdynamik. Die Wechselwirkungen zwischen den Populationen, wie die Konkurrenz, die Phytophagie und die Prädation, können mit dem Modell des metabolischen Pools wiedergegeben werden. Die Verbindung der zwei Modelle erlaubt das Studium von multitrophischen Interaktionen und eine nachfolgende Beurteilung von qualitativen Faktoren, wie Wasser und Stickstoff. Vom praktischen Standpunkt aus beurteilt, bewegt man sich dabei sukzessiv von Elementen der gezielten Schädlingsbekämpfung zu Elementen des integrierten Pflanzenschutzes und schliesslich in Richtung einer zweckmässigen Bewirtschaftung von Agroökosystemen.

SUMMARY

The demographic approach to the analysis and the management of agroecosystems is explained with a few examples. In general, populations with time-varying age structures are the elements of the systems. The time-varying distributed delay model is identified as the appropriate method to represent phenological events in the development of a population. The addition of the attrition for representing mortalities and migration permits the simulation of the population dynamics. The interactions between the populations, such as the competition, the herbivory and the predation can be studied with the metabolic pool model. The linking of the two models permits the study of multitrophic interactions and the subsequent evaluation of qualitative factors such as water and nitrogen. From the practical standpoint, one successively passes from the elements of supervised pest control to the elements of integrated pest management and to the management of agroecosystems.

REFERENCES

- ÅGREN, G. I. et BOSATTA, E.: Theory and model or art and technology in ecology. *Ecological Modelling* 50: 213-220, 1990.
- BAUMGÄRTNER, J. et BARONIO, P.: Modello fenologico di volo di *Lobesia botrana* Den. et Schiff. (Lep. Tortricidae) relativo alla situazione ambientale dell'Emilia-Romagna. *Boll. Ist. Ent. 'G. Grandi' Univ. Bologna*, 43: 157-170, 1988.
- BAUMGÄRTNER, J. et SEVERINI, M.: Microclimate and arthropod phenologies: the leaf miner *Phyllonorycter blancardella* F. (Lep.) as an example. In: PRODI, F., ROSSI, F. et CRISTOFERI, G. (éds.): *Agrometeorology*: Editrice Compositori, Bologna. 498 pp, 1987.

- BAUMGÄRTNER, J. et GUTIERREZ, A. P.: Simulation techniques applied to crops and pest models. In: CAVALLORO, R. et DELUCCHI, V. (éds.): PARASITIS 88. Proceedings of a scientific congress, Barcelona, 25–28 October. 1988. Boletín de Sanidad Vegetal, Fuera de Serie 17: 175–214, 1989.
- BAUMGÄRTNER, J., BIERI, M., KLAY, A., GENINI, M. et ZAHNER, Ph.: Fungicide side effects on the dynamics of an acarine predator-prey system in apple orchards: an explorative study with simulation models. In: GESSLER, C., BUTT, D. J. et KOLLER, B. (éds.) Integrated control of pome fruit diseases. Vol. II. WPRS Bulletin 12(6), 346 pp, 1989.
- BAUMGÄRTNER, J., SEVERINI, M. et RICCI, M.: The mortality of overwintering *Phyllonorycter blaucardella* (Lep., Gracillariidae) pupae simulated as a loss in a time-varying distributed delay model. Mitt. Schweiz. Entomol. Ges. 63: 439–450, 1990a.
- BAUMGÄRTNER, J., SEVERINI, M. et TAMO, M.: Modelli matematici demografici per la fenologia e l'interazione fra specie nella gestione dei sistemi agricoli. Società Italiana di Fitoiatria, Convegno Nazionale 'Modelli euristici ed operativi per la difesa integrata in agricoltura. Caserta, 27/29 sett. Notiziario sulle malattie delle piante 111: 19–40, 1990b.
- BAUMGÄRTNER, J., WERMELINGER, B., HUGENTOBLE, U., DELUCCHI, V., BARONIO, P., DE BERARDINIS, E., OERTLI, J. J. et GESSLER, C.: Use of a dynamic model on dry matter production et allocation in apple orchard ecosystem research. Acta Hort. 276: 123–139, 1990c.
- BEDDINGTON, J. R., HASSELL, M. P., et LAWTON, J. H. The components of arthropod predation. II. The predator rate of increase. J. Anim. Ecol. 45: 165–186, 1976.
- CERUTTI, F.; BAUMGÄRTNER, J. et DELUCCHI, V.: The dynamics of grape leafhopper populations in southern Switzerland and the implications for habitat management. Biocontrol Science and Technology, 1: 177–194, 1991.
- CLARK, L., GEIER, P., HUGHES, R. et MORRIS, R.: The ecology of insect populations in theory and practice. Methuen, London, 232 pp, 1967.
- CROFT, B. et WELCH, S. M.: Implementation research on on-line apple IPM. In CROFT, B. A. et HOYT, S. C. (éds.): Integrated management of insect pests of pome and stone fruits. Wiley, New York, 456 pp, 1983.
- CURRY, G. et FELDMAN, R. M.: Mathematical foundations of population dynamics. Texas A & M University Press, College Station, 246 pp, 1987.
- FOUQUE, F., DELUCCHI, V. et BAUMGÄRTNER, J.: Integrated management of mosquito populations in the Magadino plain (Switzerland): II. Analysis of stage-frequency data for *Aedes vexans* (MEIGEN) populations. Bull. Soc. Vector Ecology, 16 (in press), 1991.
- GETZ, W. M. et GUTIERREZ, A. P.: A perspective on systems analysis in crop production et insect pest management. Ann. Rev. Entomol. 27: 447–466, 1982.
- GILBERT, N., GUTIERREZ, A. P., FRAZER, B. D. et JONES, R. E. Ecological relationships, Freeman, Reading, 157 pp, 1976.
- GRAF, B., BAUMGÄRTNER, J. et GUTIERREZ, A. P.: Modeling agroecosystem dynamics with the metabolic pool approach. Mitt. Schweiz. Entomol. Ges. 63: 465–476, 1990.
- GUTIERREZ, A. P. et WANG, Y.: Applied population ecology: models for crop production and pest management. In: NORTON, G. A. et HOLLING, C. S. (éds.): Pest management. IIASA proceedings series 4: 255–280. Pergamon Press, Oxford, 1976.
- GUTIERREZ, A. P., BAUMGÄRTNER, J. et HAGEN, K. S.: A conceptual model for growth, development and reproduction in the ladybird beetle, *Hippodamia convergens* (Coleoptera, Coccinellidae). Can. Ent. 113: 21–33, 1981.
- GUTIERREZ, A. P., BAUMGÄRTNER, J. U. et SUMMERS, C. G.: Multitrophic models of predator-prey energetics. Can. Ent. 116: 923–963, 1984.
- GUTIERREZ, A. P., FALCON, L. A., LOEW, W., LEIPZIG, R. A. et VAN DEN BOSCH, R.: An analysis of cotton production in California: a model for Acala cotton and the effects of defoliators on its yields. Environ. Ent. 4: 125–136, 1975.
- GUTIERREZ, A. P., SCHULTHESS, F., WILSON, L. T., VILLACORTA, A. M., ELLIS, C. K. et BAUMGÄRTNER, J. U.: Energy acquisition and allocation in plant and insects: a hypothesis for the possible role of hormones in insect feeding patterns. Can. Ent. 119: 109–129, 1987.
- GUTIERREZ, A. P., WERMELINGER, B., SCHULTHESS, F., BAUMGÄRTNER, J. U., HERREN, H. R., ELLIS, C. K. et YANINEK, J. S.: Analysis of biological control of cassava pests in

- Africa: I. Simulation of carbon, nitrogen, and water dynamics in cassava. *J. appl. Ecol.* 25: 901-920, 1988 a.
- GUTIERREZ, A. P., NEUENSCHWANDER, P., SCHULTHESS, F., HERREN, H. R., BAUMGÄRTNER, J. U., WERMELINGER, B., HERREN, H. R. et ELLIS, C. K.: Analysis of biological control of cassava pests in Africa: II. Cassava mealybug *Phenacoccus manihoti*. *J. appl. Ecol.* 25: 921-940, 1988 b.
- GUTIERREZ, A. P., YANINEK, J. S., WERMELINGER, B., HERREN, H. R. et ELLIS, C. K.: Analysis of biological control of cassava pests in Africa: III. Cassava green mite *Mononychellus tanajoa*. *J. appl. Ecol.* 25: 941-950, 1988 c.
- HASSELL, M. P.: The dynamics of arthropod predator-prey systems. Princeton Univ. Press, New Jersey, 237pp, 1978.
- HASSELL, M. P., LAWTON, J. H. et BEDDINGTON, J. R. The components of arthropod predation. I. The prey death-rate. *J. Anim. Ecol.* 45: 135-164, 1976.
- HUFFAKER, C. B. et CROFT, B. A.: Integrated pest management in the U.S: progress and promise: *Environ. Health Perspectives* 14: 167-183, 1976.
- MANETSCH, T. J.: Time-varying distributed delay models and their use in aggregative models of large systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 6: 647-553, 1976.
- MANLY, B. F. J. 1987. A regression method for analyzing stage-frequency data. *Res. Pop. Ecol.* 29: 119-127, 1987.
- MANLY, B. F. J.: A review of methods for the analysis of stage-frequency data. In: McDONALD, L. L., LOCKWOOD, J. A., MANLY, B. F. J. et LOGAN, J. A. (éds.): Estimation and analysis of insect populations. Springer lecture notes in statistics 55, Springer, Berlin, 492 pp, 1989.
- SEVERINI, M., BAUMGÄRTNER, J. et RICCI, M.: Theory and practice of parameter estimation of distributed delay models for insect and plant phenologies. In: GUZZI, R., NAVARRA, R. A. et SHUKLA, J. (éds.): Meteorology for Environmental Sciences. World Scientific Publishing, Singapore, 1990 a.
- SEVERINI, M., BAUMGÄRTNER, J. et RICCI, M.: Dalle osservazioni fenologiche alla costruzione di un modello demografico. Società Italiana di Fitoiatria, Convegno nazionale modelli euristici ed operativi per la difesa integrata in agricoltura. Caserta, 27/29 sett. Notiziario sulle malattie delle piante 111: 41-56, 1990 b.
- TAMO, M. et BAUMGÄRTNER, J. 1991a. Analysis of the cowpea agro-ecosystem in West Africa: I. A demographic model for carbon acquisition and allocation in cowpea, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. *Ecological Modelling* (submitted 1991).
- TAMO, M., BAUMGÄRTNER, J. et GUTIERREZ, A. P. 1991b. Analysis of the cowpea agro-ecosystem in West Africa: II. Modelling the interactions between cowpea and the bean flower thrips *Magalurothrips sjostedti* (Trybom) (Thysanoptera, Thripidae). *Ecological Modelling* (submitted 1991).
- TOFT, C. A.: Communities of species with parasitic life-styles. In: DIAMOND, J. et CASE, T. J. (éds.): Community-Ecology, Harper et Row, Cambridge, 655 pp, 1986.
- VANSICKLE, J.: Attrition in distributed delay models. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 7: 635-638, 1977.
- VON FOERSTER, H.: Some remarks on changing populations. In: STOHLMANN, F. Jr. (éd.): The kinetics of cellular proliferation. Grune and Stratton, New York, p. 382-407, 1959.
- WANG, Y., GUTIERREZ, A. P., OSTER, G. et DAXL, R.: A population model for plant growth and development: coupling cotton-herbivore interactions. *Can. Ent.* 109: 1359-1374, 1977.
- WELCH, S. M.: Developments in computer-based IPM extension delivery systems. *Ann. Rev. Entomol.* 29: 359-381, 1984.
- WELCH, S. M., CROFT, B. A., BRUNNER, J. F. et MICHELS, M. F.: PETE: an extension phenology modelling system for management of multispecies pest complex. *Environ. Ent.* 7: 482-494, 1978.
- WERMELINGER, B., BAUMGÄRTNER, J. et GUTIERREZ, A. P.: A demographic model of assimilation and allocation of carbon and nitrogen in grapevines. *Ecological Modelling* 53: 1-26, 1990.
- ZAHNER, Ph. et BAUMGÄRTNER, J.: Analyse des interactions plante-tétranyques-phytoseiids. I. Modèles de population pour la dynamique de *Panonychus ulmi* et *Tetranychus urticae* en vergers de pommier. *Acta Oecologica, Oecol. Applic.* 9: 311-331, 1988.